

Рис. 4. Распределение газов по высоте топливной насадки при различных значениях содержания кислорода в дутье:
 — 21 %; — 22 %; — 23 %; — 24 %; — 25 %

Список использованных источников

1. Селянин И.Ф. Теория и практика интенсификации технологического процесса в шахтных печах малого диаметра: в 3 т. Т. 1 / И.Ф. Селянин, А.В. Феоктистов, С.А. Бедарев. – М.: Теплотехник, 2010. – 379 с.
2. Чернышов Е.А. Плавильные печи литейных цехов. Ч. 1. Вагранка / Е.А. Чернышов. – Нижний Новгород: Нижегородский гос. техн. ун-т, 2011. – 196 с.
3. Селянин И.Ф. Ваграночный процесс с оптимальным распределением дутья по высоте зоны горения / И.Ф. Селянин, Г.Л. Маркс; Сиб. гос. горно-метал. акад. – Новокузнецк: СибГГМА, 1996. – 218 с.

УДК 004.94

В. П. Цымбал, П. А. Сеченов, А. А. Оленников

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный индустриальный университет»,
 г. Новокузнецк, Россия

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ СЕПАРАЦИИ МЕТОДОМ СГЛАЖЕННЫХ ЧАСТИЦ (SPH)

Аннотация

В статье рассматриваются особенности решения задачи численного моделирования гравитационной сепарации дисперсных частиц. Создана имитационная модель с использованием метода Монте-Карло, в которой в качестве первых принципов (элементарных частиц) выступают частицы шихты и продукты реакции. В качестве языка программирования был выбран объектно-ориентированный язык ActionScript 3.0. При этом самой сложной (вычислительной) задачей является поиск соседей (сложности N^2). В данной статье приведён ана-

лиз сопоставления улучшенного алгоритма поиска соседей сложности $(2 \cdot N \cdot k)$ со стандартным перебором поиска соседей; в качестве объекта сопоставления выступает количество отображаемых частиц, передвигающихся в режиме реального времени.

Ключевые слова: моделирование течений, гравитационный сепаратор, метод Монте-Карло, сглаженные частицы, сложность алгоритма, поиск соседей.

Abstract

The article deals with the peculiarities of solving the problem of numerical simulation of gravity separation of dispersed particles. A simulation model is created using the Monte Carlo method, in which the first principles (elementary particles) are charge particles and reaction products. The object-oriented language ActionScript 3.0 was chosen as the programming language. At the same time, the most difficult (computational) task is to find neighbors (complexity N^2). In this article the analysis of comparison of the improved algorithm of search of neighbors of complexity $(2 \cdot N \cdot k)$ with standard search is given; the object of comparison the quantity of the displayed particles moving in real time acts.

Key words: modeling of flows, gravity separator, the Monte Carlo method smoothed particles, complexity of the algorithm, search for neighbors.

В связи с прогрессом компьютерных технологий, роль методов математического моделирования для исследования сложных взаимосвязанных физических процессов продолжает расти. Для численного моделирования необходима как мощная вычислительная техника, так и численные алгоритмы и коды, позволяющие эффективно эксплуатировать компьютеры и изучать интересующие физические задачи с высокой точностью и гибким подходом для введения новых физических процессов.

Целью работы является сравнение быстродействия алгоритмов поиска соседей в имитационной модели гравитационного сепаратора [1]. На основе существующих и хорошо апробированных методов решения системы газодинамических уравнений разработано большое количество пакетов программ для моделирования течений с целью предсказания их характеристик и рабочих параметров современных инженерных устройств: Fluent [2], FlowVision.

Сравнение численных методов. В настоящее время из всего широкого диапазона численных методов используются следующие: метод сглаженных частиц Лагранжа SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) и методы Эйлера на адаптивных сетках AMR (Adaptive Mesh Refinement) [3]. В данной работе выбран бессеточный метод Лагранжа, т.к. отсутствие сетки является особенно важным. В методе SPH для представления газовой среды используется распределенный в пространстве набор частиц. Каждая частица движется под действием обращенных на неё сил, распределение частиц в системе меняется в процессе её эволюции. Гидродинамические величины, такие как плотность или давление, определяются как результат вклада частиц в некоторой области.

Одним из несомненных преимуществ метода SPH по сравнению с сеточными методами является использование постоянной величины вычислительных ресурсов в течение всего времени счета. В отличие от методов с использованием адаптивных сеток, которые изменяют количество рассчитываемых точек в пространстве с целью уточнения результатов, метод сглаженных частиц обеспечи-

вает высокое разрешение при постоянном числе частиц. Так как частицы концентрируются в областях более высокой плотности, в них гарантирована высокая точность расчетов.

Задача создания имитационной модели процессов физического взаимодействия дисперсных частиц шихты, витающих в потоке газа, не имеет детерминированного решения. Одним из возможных путей её решения является имитационное моделирование с использованием методов Монте-Карло и «первых принципов».

Метод Монте-Карло появился более чем полвека назад [4], но интерес к этому методу [5, 6] увеличивается. Наиболее сложные и близкие к рассматриваемой ниже имитационной модели задачи [7] связаны с прохождением пучков элементарных частиц через вещества (преграды).

Физическая постановка задачи. Ядром рассматриваемой ниже модели является процесс обтекания конденсированной частицы вертикальным потоком газа. Прежде всего, рассмотрим механизм витания и взаимодействия дисперсных частиц шихты и продуктов реакции в вертикальном потоке несущего газа.

В условиях динамического равновесия принцип Д'Аламбера для движущейся частицы приводит к уравнению:

$$F_G - F_C - F_A = m \frac{d\omega_{ms}}{dt}, \quad (1)$$

где ω_{ms} – скорость движения сферической частицы. В зависимости от соотношения этих сил частица может подниматься, опускаться или оставаться неподвижной.

Сила тяжести выражается как:

$$F_G = mg. \quad (2)$$

Сила давления потока:

$$F_C = c \cdot S \cdot \rho \cdot \frac{\omega^2}{2}, \quad (3)$$

где S – площадь сечения обтекаемого тела по миделю (площадь проекции тела на плоскость, перпендикулярную векторам скорости набегающего потока); ρ – плотность смеси; ω – скорость потока смеси; c – коэффициент лобового сопротивления, который зависит от формы обтекаемого тела и числа Рейнольдса.

Подъемная или архимедова сила:

$$F_A = \frac{m}{\rho_{ms}} \rho \cdot g. \quad (4)$$

Из уравнений (1) – (4) получим:

$$\frac{d\omega_{ms}}{dt} = g \left(1 - \frac{\rho}{\rho_{ms}} \right) - \frac{c \cdot \rho \cdot \omega^2}{2 \cdot m} \cdot S. \quad (5)$$

При этом необходимо одновременно отображать процесс взаимодействия огромного числа частиц, которые соударяются между собой, со стенками и решетками гравитационного сепаратора, что накладывает определенный отпечаток на разработку технологии создания имитационной модели рассмотренных выше

процессов. Также требуется физическая адекватность и наглядность анимации, удобный для пользователя (исследователя) интерфейс статистических исследований и анализа.

На основе анализа существующих подходов принято решение написать программу на объектно-ориентированном языке программирования, наиболее подходящем под эти требования. Рассматривались следующие языки программирования: Delphi, Visual C# [8] и ActionScript 3.0 [9]. В связи с тем, что разрабатываемая модель должна быть визуализирована и анимирована (движение, взаимодействие частиц в гравитационном сепараторе в реальном времени), был выбран объектно-ориентированный язык программирования ActionScript 3.0, имеющий возможность отображения большого числа объектов на сцене, встроенные функции добавления (удаления) из массива объектов, функции проектирования 3D объекта на плоскость и др.

В программной реализации происходят следующие основные этапы вычисления:

1. Определение нового положения частицы с учетом действующих на неё сил, которые зависят от характеристик потока (скорости и плотности), а также проверка граничных условий (столкновение со стенками и решетками) и проверка вылета частицы из сепаратора.

2. Поиск соседей для каждой частицы, определение столкновений и изменений векторов скоростей для столкнувшихся частиц.

3. Расчет характеристик потока (скорости и плотности) по высоте канала, с учётом текущего положения частиц.

Наиболее трудоёмкой задачей является задача поиска соседей, которая будет рассматриваться ниже.

Сравнение алгоритмов поиска соседей. Как показали результаты экспериментов на имитационной модели полный перебор поиска соседей для определения столкновений и расчета сил между частицами является не тривиальной задачей сложности $O(N^2)$ [10]. Т.к. большинство частиц находятся на значительном удалении друг от друга, а лишь небольшое количество других частиц находится рядом с ней, то производить расчет сил взаимодействия с другими частицами нет необходимости. Чтобы отсеять эти частицы, пространство делится на ячейки, при этом размеры ячейки не должны быть меньше, чем возможное перемещение частицы по направлению в промежутке времени между расчетами поиска соседей (в данном случае это расстояние, которое может пролететь частица за одну тридцатую секунды). Каждая такая ячейка содержит объекты, находящиеся в ней. Таким образом, для каждой частицы сужается круг поиска соседей.

Алгоритм поиска соседей на каждой итерации:

1. Определить положение частиц с учётом сил, действующих на одну частицу.

2. Для каждой частицы найти номер ячейки, в которой она размещается.

3. Для каждой частицы определить пересечение с частицами, находящимися в текущей ячейке и соседних ячейках и, если они пересеклись, определить новое положение и вектора скоростей частиц.

Сложность такого алгоритма будет составлять $O(2 \cdot N \cdot k)$, где N – количество частиц, k – количество соседних частиц в ячейках.

Тестирование данного алгоритма было произведено для задачи на плоскости (2-х мерное пространство), где частицы в режиме реального времени совершали броуновское движение. На рисунке 1 показаны результаты сравнения двух алгоритмов поиска соседей.

В задаче гравитационной сепарации пыли марганцевого производства [11], количество отображаемых частиц увеличилось с 150 до 600. Это связано с тем, что для каждой частицы решается более сложная задача (в том числе 3-х мерная), а также необходимо учитывать распределение скоростей и плотностей по высоте колонного реактора.

Рассмотренный подход к имитационному моделированию в сочетании с предложенным методом позволяет решать широкий круг задач, связанных с изучением движения гетерогенных потоков, в которых взвешены частицы с большим диапазоном изменения гранулометрического состава, то есть задачи, где невозможно допущение о гомогенности или псевдогомогенности.

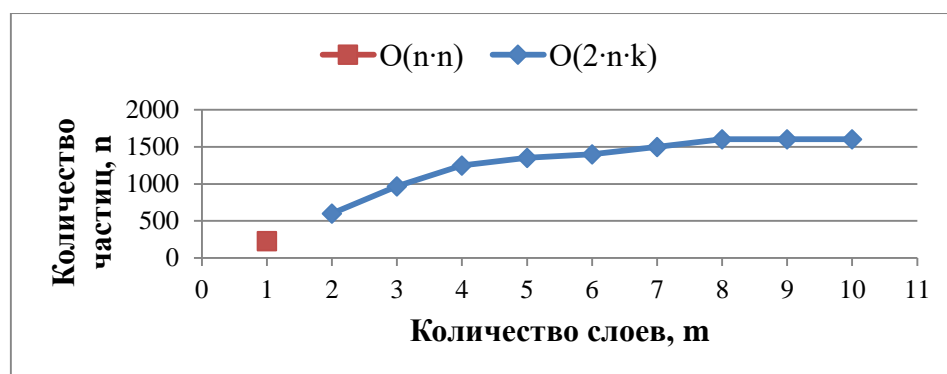


Рис. 1. Зависимость количества отображаемых частиц от выбора алгоритма и количества рассматриваемых слоёв в нём

Заключение. При численной реализации рассмотренной имитационной модели, был выбран метод сглаженных частиц, позволяющий более эффективно решать данную задачу, т.к. неравномерное распределение по высоте колонного реактора не сказывается на точности результатов, по сравнению с методом на адаптивных сетках. В реализации алгоритма гравитационной сепарации наиболее ресурсоёмкой задачей было нахождение поиска соседей, для чего был предложен более эффективный метод, позволивший увеличить количество отображаемых и рассчитываемых частиц в 4 раза.

Список использованных источников

1. Цымбал В.П. Имитационное моделирование взаимодействия дисперсных частиц в агрегате СЭР и гравитационная сепарация / В.П. Цымбал, В.В. Павлов, П.А. Сеченов, А.А. Оленников // Черные металлы. 2016. №6 (1014). С. 54-60.

2. Вальгер С.А. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent / С.А. Вальгер, А.В. Федоров, Н.Н. Федорова // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 5. С. 27-40.
3. Лазарева Г.Г. Современные численные методы гравитационной газовой динамики // Вестник НГУ. Серия: математика, механика, информатика. 2010. Т. 10, № 1. С. 40-64.
4. Metropolis N., Ulam S. The Monte Carlo Method, – J. Amer. Statistical assoc. 1949. Vol 44. № 247. Pp. 335-341.
5. Kroese D.P., Brereton T., Taimre T., Botev Z. I. Why the Monte Carlo method is so important today. WIREs Comput Stat 6, 2014. Pp. 386-392.
6. Dunn W.L., Shultis J.K. Exploring Monte Carlo Methods. Elsevier, 2011. – 398 p.
7. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods. Wiley, 2011. 743 p.
8. Лавров В.В. Технология и средства разработки программного обеспечения информационно-моделирующих систем для решения технологических задач доменного производства / В.В. Лавров, Н.А. Спирин, А.А. Бурыкин, А.В. Краснобаев // Математическое и программное обеспечение систем в промышленной и социальной сферах. 2012. № 2. С. 147-152.
9. Справочник по ActionScript 3.0 для платформы AdobeFlash. URL: http://help.adobe.com/ru_RU/FlashPlatform/reference/actionscript/3/ (дата обращения: 16.04.2018).
10. Гусев Д.И. Алгоритм поиска ближайших соседей // Программные продукты и системы. 2012. № 3. С. 231-234.
11. Сеченов П.А. Имитационная модель разделения составляющих пыли марганцевого производства / П.А. Сеченов, В.П. Цымбал, А.А. Оленников // Кибернетика и программирование. 2016. № 2. С. 34-41.

УДК 162.2:0043.94

Н. А. Черемискина, Н. Б. Лошкарев, В. В. Лавров, Н. А. Спирин

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОЙ РАБОТЫ СОВРЕМЕННОЙ КОНСТРУКЦИИ КАМЕРНОЙ ПЕЧИ БАРАБАННОГО ТИПА

Аннотация

В докладе представлена схема и особенности тепловой работы камерной печи барабанного типа для нагрева металлических изделий под закалку. Приведены технические характеристики печи, некоторые результаты теплотехнического расчета. Представлено компьютерное моделирование процессов движения газа и теплообмена в печи. Исследование произведено с использованием САЕ-системы (CAE, Computer Aided Engineering) – программного